

信号交差点における幾何構造と進入条件を考慮した右折走行軌跡のモデル化^{*1}

A Trajectory Estimation Model of Right-turning Vehicles at Signalized Intersections Considering Road Geometry and Entering Conditions ^{*1}

鈴木 一史^{*2}・中村 英樹^{*3}・石黒 公規^{*4}

By Kazufumi SUZUKI^{*2}, Hideki NAKAMURA^{*3} and Kiminori ISHIGURO^{*4}

1. はじめに

交差点での右折時の交差点内動線の違いは、横断歩行者の視認性や信号切り替わり時の交錯位置の違いとなつて現れ、歩行者との交錯危険性やクリアランス時間設定に影響を与える。とりわけ多車線道路が交差する大規模信号交差点では、交差点内部での空間的自由度が高く、車両動線や走行速度は様々に変化しうる。これらに影響を与える要因として交差点幾何構造や路面標示、信号制御などが挙げられるが、現状では未だ十分な調査研究が行われていない。

交差点幾何構造や信号制御を変更したときの車両動線や走行速度の変化を予測できれば、交差点改良前後での安全性の評価が可能となるほか¹⁾、交錯位置の変化をみることで損失時間の適正な評価により適切な全赤時間の設定にも寄与すると考えられる。とりわけ右折走行軌跡は信号切り替わり時においてクリティカルな動線であり、その動線を把握することは安全上また円滑上、必要不可欠である。

そこで、本研究では信号交差点における右折走行軌跡に与える影響について分析し、交差点幾何構造および右折車の進入条件に応じて、その走行軌跡を推定可能なモデルを構築することを目的とする。

2. 調査対象交差点の概要およびデータ取得方法

(1) 調査対象交差点の概要

幾何構造の異なる 5 箇所の交差点においてビデオ観測調査を実施した(図-1)。対称交差点の概要および幾何構造の諸量を表-1 に示す。いずれの交差点も右折専用車線および右折専用現示が設置されている。

(2) データの取得方法

本研究で対象とする右折車両は、右折専用現示表示中

およびその切り替わり時に進入した車両を対象とする。また、周辺車両の影響を受けないよう、右折車両の交差点進入時に交差点内および流出部近傍に他の車両が存在しておらず、かつ交差点流出後に車線変更をしなかった右折車両を対象とした。

右折走行軌跡の取得に際しては、ビデオ画像処理システム²⁾を用いて、0.1~0.5 秒おきに車両の走行位置(左後輪タイヤの接地点)を追跡し、カルマンスムージングにより観測誤差を取り除くとともに 1/30 秒単位の位置座標データに補間推定することで位置、速度データを収集した。なお、走行軌跡は直線走行区間を含むよう交差点および交差点流入前後 40m の区間で取得している。

3. 分析方法および右折走行軌跡のパラメータ化

(1) 分析方法

右折走行軌跡を定量的に分析するために、本研究では軌跡の曲率変化に着目する。例として図-2 に右折車の走行距離 曲率図を示すが、右折時には曲率変化が一定となる部分がみられる。このように曲率変化が一定となる線形に直線、円弧、クロソイドがある。右折走行軌跡はこれら線形要素で近似できると考えられることから、本研究では距離に応じた曲率変化のデータを基に複数の線形要素で右折走行軌跡を表すことを試みる。

(2) 線形要素あてはめによる右折軌跡のパラメータ化

右折走行軌跡に対して複数の線形要素をあてはめることで走行軌跡のパラメータ化を行う。その手順を以下に示す。

(a) 右折走行軌跡の曲率の計算

ある軌跡座標点 p_i における曲率は、点 p_i とその近傍の 2 点 p_{i-1} , p_{i+1} を通る円の曲率半径より得ることができる。具体的には、ベクトル $v_1 = p_i - p_{i-1}$, $v_2 = p_{i+1} - p_i$ を用いて以下の式より計算される。

$$\kappa_i = \frac{2 \sin(\theta/2)}{\sqrt{|v_1| \cdot |v_2|}} \quad (1)$$

ここで、 $\theta = \arccos(v_1/|v_1| \cdot v_2/|v_2|)$ である。本研究では安定して曲率を推定するために、1/30 秒ごとに推定された軌

*1 キーワーズ: 交差点, 幾何構造, 右折車, 走行軌跡

*2 正会員, 修(工), 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 (名古屋市千種区不老町, E-mail: kazu@genv.nagoya-u.ac.jp)

*3 正会員, 工博, 名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

*4 正会員, 修(工), 中日本高速道路株式会社



図-1 調査対象交差点(写真上が北)

表-1 調査対象交差点の概要

| 交差点名 | 西大須 | | | 桜山 | | | 末盛通2 | | | | 川名 | 砂田橋 | |
|-------------------------------------|-------------------------|------|------|-------------------------|------|------|--------------------------|--------------------|------|--------------------|------------------------|-------------------------|------|
| | 東 | 北 | | 東 | 南 | 北 | 東 | 西 | 南 | 北 | 北 | 西 | 北 |
| 調査流入部 | | | | | | | | | | | | | |
| 車線数 | 流入部 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| | 流出部 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| 右折時の交差角度[°] | 106 | 74 | 84 | 90 | 96 | 113 | 88 | 93 | 67 | 106 | 90 | 91 | |
| 交差点中心 ^{*1} から中央分離帯までの距離[m] | 流入部 | 27.2 | 31.1 | 31.5 | 22.9 | 29.7 | 15.3 | 15.3 ^{*2} | 17.2 | 23.0 | 35.4 | 19.3 | 15.3 |
| | 流出部 | 29.2 | 31.0 | 27.7 | 29.2 | 28.8 | 19.4 | 13.9 | 12.0 | 13.6 ^{*2} | 24.1 | 18.5 | 19.1 |
| 中央分離帯ノーズ付近のゼブラ路面標示の有無(1:あり, 0:なし) | 流入部 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 ^{*2} | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| | 流出部 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 ^{*2} | 0 | 1 | 0 |
| 調査日時および時間帯 | 2008/1/18 9:00-12:00 | | | 2008/12/4 7:30-10:30 | | | 2008/11/18 9:00-12:00 | | | | 2008/12/1 7:30-9:00 | 2008/6/27 7:00-11:00 | |

*1: 中央分離帯の延長線同士の交点 *2: 末盛通2交差点西流入部にはゼブラ標示上にラバーポールが設置されているため、これらは中央分離帯とみなした

跡点データから曲率を計算する。推定された曲率の例を図-2に示す。

(b) 線形要素のあてはめ

線形要素をあてはめるために、曲率変化を複数の折れ線により近似する。本研究では、車線変更をしない車両を対象としていることから、右折の前後には必ず直線区間(曲率=0)を含むものとした。曲線部ではクロソイドおよび円弧、またはクロソイドのみのいずれかで構成されるものと考え、5分割または4分割で折れ線近似したときに誤差が最小となる分割位置を動的計画法により探索する。5分割では「直線-クロソイド-円弧-クロソイド-直線」、4分割では「直線-クロソイド-クロソイド-直線」という構成になる。なお、探索時には計算コスト削減のため、1/30秒から1/10秒にダウンサンプリングした軌跡データを使用した。図-2に5分割で折れ線近似された場合のあてはめ結果を示す。

(c) 線形要素パラメータの計算

あてはめた直線の傾きおよび切片からクロソイドのパラメータ A_1, A_2 , 最小曲率半径 R_{min} を算出するとともに、曲線区間の開始点、終了点であるBC点, EC点, さらに直線区間の延長線上の交点であるIP点を求め、これらを基に走行軌跡の位置座標を再計算する。図-3に図-2のあてはめ結果のときの再現軌跡を示す。図-3のようにIP点, 交差角, 方向角, クロソイドのパラメータおよび円弧区間の曲率半径が与えられれば走行軌跡が定まる³⁾。

4. 分析結果

3章で述べた分析方法により、各交差点流入部における右折走行軌跡について、線形要素パラメータ A_1, R_{min} ,

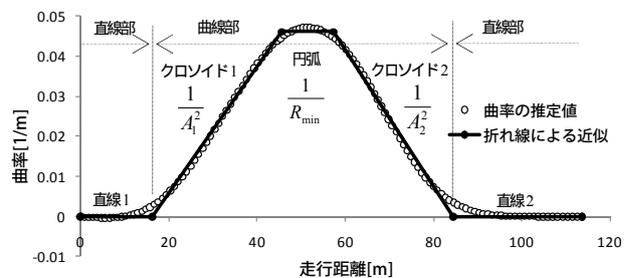


図-2 右折走行軌跡の距離 - 曲率図

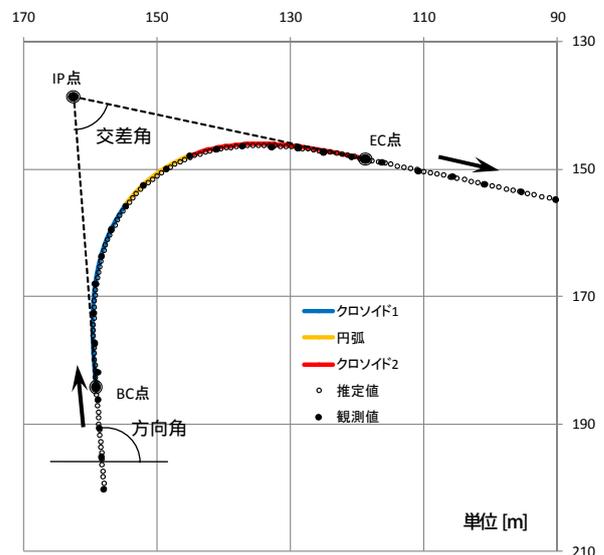


図-3 線形要素のあてはめ結果(図2と同一車両)

A_2 を算出した。対象車両 145 台のうち、本手法により 135 台(93%)の車両について良好にあてはめることができた。あてはめが困難なケースとして、交差点内での急激な加減速およびハンドル操作が生じた車両が挙げられる。

(1) 流入部ごとの線形要素パラメータ

表-2に流入部別の線形要素パラメータの算出結果を示す。これより、交差点サイズが大きいほどパラメータの

表-2 算出された流入部ごとの線形要素パラメータ

| 交差点名 | 流入部 | A ₁ | | R _{min} | | A ₂ | | サンプル数 |
|-------|-----|----------------|----------|------------------|----------|----------------|----------|-------|
| | | 平均 [m] | 標準偏差 [m] | 平均 [m] | 標準偏差 [m] | 平均 [m] | 標準偏差 [m] | |
| 西大須 | 東 | 36.4 | 1.7 | 31.6 | 2.7 | 31.9 | 2.8 | 3 |
| | 北 | 23.6 | 2.9 | 22.3 | 2.3 | 27.5 | 3.0 | 7 |
| 桜山 | 東 | 26.7 | 1.7 | 22.6 | 2.0 | 24.4 | 1.7 | 5 |
| | 南 | 23.6 | 2.6 | 21.2 | 3.7 | 23.7 | 2.3 | 6 |
| 北 | 東 | 30.5 | 1.1 | 24.7 | 3.9 | 25.2 | 4.5 | 2 |
| | 北 | 22.0 | 4.3 | 27.2 | 2.2 | 27.6 | 3.4 | 5 |
| 末盛通 2 | 西 | 19.2 | 2.2 | 19.2 | 3.3 | 19.1 | 1.7 | 4 |
| | 南 | 22.1 | 3.1 | 20.5 | 2.9 | 22.3 | 2.1 | 6 |
| | 北 | 24.5 | 1.5 | 15.0 | 0.9 | 17.4 | 1.8 | 4 |
| 川名 | 北 | 27.8 | 4.4 | 25.0 | 5.5 | 27.4 | 4.5 | 13 |
| | 西 | 21.0 | 2.3 | 19.9 | 2.7 | 20.7 | 2.9 | 15 |
| 砂田橋 | 北 | 20.1 | 3.1 | 17.1 | 0.6 | 20.4 | 1.8 | 4 |

(交差点流出後に最内側車線を走行した車両のみ集計)

値も大きくなっている。また、川名交差点では交差点規模の割に R_{min} が大きいですが、これは、停止線位置が大きくセットバックしており、かつ交差角度も鈍角であることから、大きな曲率半径で転回しているためと考えられる。さらに、川名交差点ではパラメータのばらつきも他の交差点と比べて大きいことから、右折時の動線の自由度が高い交差点であるといえる。

(2) 線形要素の構成比

図-4 に流出後最内側車線を走行した右折車両について、軌跡曲線部における線形要素の構成比を示す。これより、交差角度が直角に近いとクロソイド 1 区間とクロソイド 2 区間の比率がほぼ等しく対称に近い軌跡になるといえる。また、末盛通 2 交差点の北側流入部ではクロソイド 1 区間の比率が特に高い。これは右折後の西側流入部にラバーポールが設置されており、表-2 より最小曲率半径が非常に小さいことからわかるように、右折時にハンドルを素早く操作する必要があり、相対的にクロソイド 2 の区間が短くなることが要因として挙げられる。以上より、右折走行軌跡は交差点の幾何構造要素と強い関係があるといえる。

5. 右折走行軌跡のモデル化

(1) 右折走行軌跡のモデル分析

右折走行軌跡の各線形要素パラメータを道路構造要素から説明するモデルを重回帰分析により構築する。説明変数として、図-5 に示すように道路幾何構造要素として右折時の交差角度、IP 点から中央分離帯ノーズ端までの距離 D_{HN}、停止線までの距離 D_{SL}、中央分離帯ノーズ付近ゼブラ標示末端までの距離 D_{SN} を、また、車両の進入条件として流入前(停止線位置)、交差点中央部、流出後(交差方向停止線)における前後 2.5m の範囲での平均走行速度を、さらには、流入側および流出側におけるゼブラ

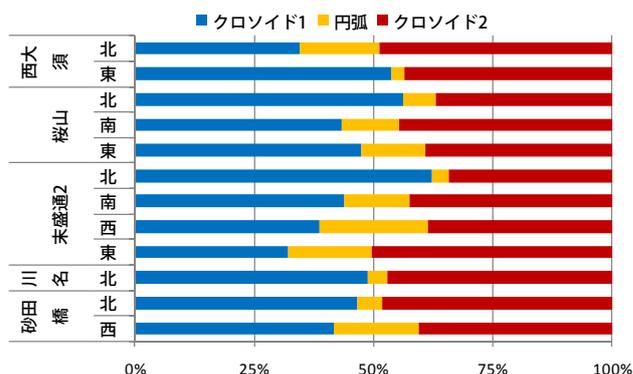


図-4 流入部別の曲線部における線形要素の構成比 (交差点流出後に最内側車線を走行した車両のみ集計)

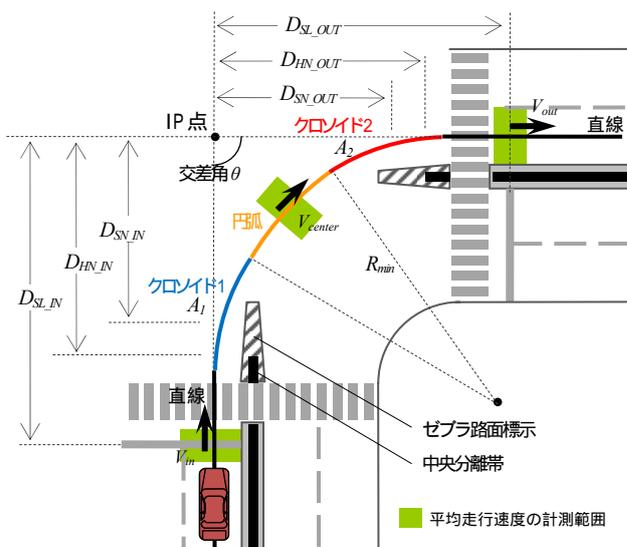


図-5 考慮する道路幾何構造要素の諸量

表-3 右折走行軌跡の線形要素パラメータの推定結果

| 線形要素パラメータ | クロソイド 1 A ₁ | 円弧 R _{min} | クロソイド 2 A ₂ |
|--|-------------------------|---------------------|------------------------|
| 説明変数 | 係数(t 値) | 係数(t 値) | 係数(t 値) |
| 定数項 | -8.65(-3.33) | -17.5(-4.86) | -15.0(-4.41) |
| 右折時の交差角度 θ [°] | 0.139(4.94) | 0.260(7.77) | 0.190(7.29) |
| IP 点から中央分離帯までの距離 [m] | 流入側 D _{HN_IN} | - | 0.165(3.14) |
| | 流出側 D _{HN_OUT} | - | 0.255(4.48) |
| MIN(D _{HN_IN} , D _{HN_OUT}) [m] | - | 0.349(6.18) | - |
| 交差点内通過速度 V _{center} [km/h] | 0.465(7.09) | 0.244(2.82) | - |
| 交差点流出後速度 V _{out} [km/h] | - | - | 0.293(4.95) |
| 流入部ゼブラ路面標示ダミー (ゼブラあり:1, ゼブラなし:0) | 2.83(3.33) | - | - |
| R ² 値 | 0.628 | 0.461 | 0.525 |
| サンプル数 | 135 | | |

路面標示の有無を表すゼブラ路面標示ダミーを用いて分析を行った。

(2) モデル分析の結果

係数の符号条件の妥当性および統計的な有意性を勘案し採用されたモデルを表-3 に示す。A₁, R_{min}, A₂ のい

れも交差角度が大きくなると値は大きくなり、曲線の曲率変化は緩やかになることがわかる。

IP 点から中央分離帯までの距離は、クロソイド 1 では流入部のみが、クロソイド 2 では流入部、流出部ともに有意となった。IP 点から停止線までの距離も有意であったが、中央分離帯ノーズ端までの距離を用いた方がより説明力が高かった。また、ゼブラ標示末端までの距離は有意ではなかった。したがって、右折挙動には物理的な障害物の存在が強く影響しているといえる。

車両の走行速度については、交差点中央部での平均速度が高いほど、クロソイド 1 および円弧区間は長く緩やかになる結果となった。流入部(停止線位置)での走行速度は有意にならなかったが、これは交差点中央部に比べ流入前では速度のばらつきが大きいと考えられる。一方、クロソイド 2 では交差点流出後の走行速度が有意になった。

路面標示はクロソイド 1 において流入部でのゼブラ路面標示ダミーが有意となった。ゼブラ路面標示があることでクロソイド 1 が大きくなる、すなわち、ゼブラ標示を避けるよう緩やかな転回軌跡を描くことがわかる。

以上より妥当な結果といえるが、交差点内部での速度変動についてはさらに精査が必要である。

(3) 推定軌跡の比較

図-6 に未盛通 2 交差点南側流入部における観測軌跡とモデル推定軌跡を示す。ここで、観測軌跡はパラメータより再計算された軌跡であり、比較のため両者ともに個々の軌跡の IP 点位置が同一位置となるようシフトさせている。この図より、走行軌跡は平均的には概ね良好に再現されているが、円弧区間の推定精度の向上が今後の課題である。また、推定される走行軌跡の確率的な変動についても、さらに詳細な分析が必要である。

6. おわりに

本研究では、右折走行軌跡の曲線区間を円弧、クロソイドの線形要素に分割近似することで、各線形要素のパラメータと交差点幾何構造および右折車の進入条件との関連について分析し、幾何構造要素および右折車の走行速度から右折走行軌跡を推定するモデルの構築を行った。

今回は、主として交差点幾何構造と右折車の進入条件に着目し、走行軌跡の分析とモデル化を行ったが、右折車の走行速度は信号切り替わり時の交差点進入タイミングによって大きく変動するものと考えられるため、この点について今後は詳細な分析を行う必要がある。また、本研究では路面標示の影響について、ゼブラ路面標示の有無のみを考慮した分析にとどまっているが、今後は右折導流標示などの交差点内路面標示の形状および設置位置が、右折走行軌跡のばらつきに与える影響についても

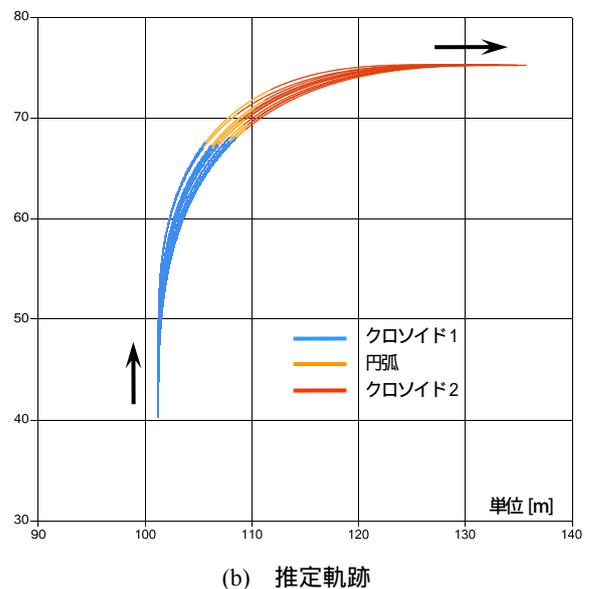
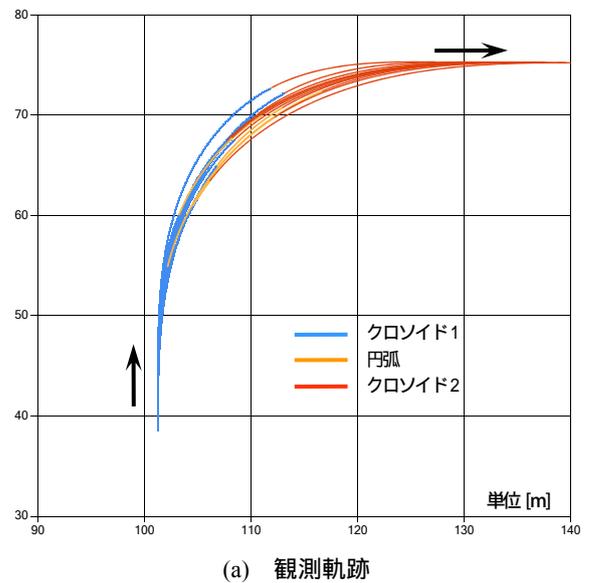


図-6 観測軌跡と推定軌跡の比較
(未盛通 2 交差点南側流入部)

分析を進める予定である。これらより、信号交差点における制御と幾何構造の双方に応じて交差点内動線および進入タイミングが変化する車両挙動モデルの構築を進めていくことで、交差点改良時における車両挙動の時間的・空間的变化を再現可能なシミュレーションモデルを開発し、安全性の定量的な評価へ繋げていきたい。

参考文献

- 1) 鈴木一史, 中村英樹: 交差点安全性評価を目的とした 2D ナノシミュレーションにおける利用者挙動の表現, 土木計画学研究・講演集, Vol.37, 2008.6.
- 2) 鈴木一史, 中村英樹: 交通流解析のためのビデオ画像処理システム TrafficAnalyzer の開発と性能検証, 土木学会論文集 D, Vol.62, No.3, pp.276-287, 2006.7.
- 3) 日本道路協会: クロソイドポケットブック改訂版, 369p, 2004.2.